

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
UNIVERZITNÍ STUDIJNÍ PROGRAMY

Hybridní baterie pro aplikace v automobilové technice
Hybrid Battery for Automotive Application

Zadání bakalářské práce

Student:

Petr Obruča

Studijní program:

B3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906R007 Automobilová elektronika

Téma:

Hybridní baterie pro aplikace v automobilové technice
Hybrid Battery for Automotive Application

Zásady pro vypracování:

1. Provedte analýzu vlastností dostupných akumulčních prvků pro využití v hybridních bateriích.
2. Navrhněte koncepční řešení hybridní baterie jako startovacího akumulátoru.
3. Navrhněte a ověřte vhodné schéma měniče hybridní baterie.
4. Navržené řešení ověřte pomocí počítačových simulací

Seznam doporučené odborné literatury:


LINDEN, D., REDDY, J.: Handbook of Batteries, 3rd Edition, New York, McGraw-Hill, 2002, ISBN 0-07-135978-8
LARMINIE, J., LOWRY, J.: Electric Vehicle Technology Explained, John Wiley & Sons Ltd, England, 2003, ISBN 0-470-85163-5
EHSANI, M., GAYO, Y., GAY, S., EMADI, A.: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA, 2005, ISBN 0-8493-3154-4
ŠTĚRBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer press, Praha, 2004
VLK, F.: Elektrická zařízení motorových vozidel. Prof. Ing. František Vlk, DrSc., nakladatelství a vydavatelství, Brno 2005, ISBN 80-239-3718-9

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Petr Chlebiš, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskiewicz, CSc.
prorektor pro studium



Místopřísežné prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě.....

.. ..

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1988 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Petr Obruča

Adresa trvalého pobytu autora práce:

U Parku 1a – Ostrava 1

PSČ: 70200

Poděkování

Děkuji prof.Ing. Petru Chlebišovi, CSc. za hodnotné rady, odborné vedení a hlavně za čas, který mi věnoval během vedení mé práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem hybridní baterie pro aplikace v automobilové technice. V první části bakalářské práce je provedena analýza vlastností dostupných akumulčních prvků pro využití v hybridní baterii. Dále se práce zabývá návrhem koncepčního řešení hybridní baterie jako startovacího akumulátoru. V třetí části je navrženo vhodné schéma měniče hybridní baterie. Následuje ověření navrhovaného řešení pomocí počítačových simulací. Celkové shrnutí práce je obsaženo v závěru.

Klíčová slova:

hybridní baterie, DC/DC měnič, ultrakapacitor, akumulátor

Abstract

This thesis describes the design of hybrid batteries for applications in automotive technology. The first section is an analysis of characteristics of available storage elements for use in hybrid battery. Then the paper deals with conceptual hybrid battery as a starter battery. In the third part of the proposed scheme should drive hybrid battery. In the next part there is verification of the proposed solutions using computer simulations. Overall summary of the work is contained in the conclusion.

Keywords:

hybrid battery, DC/DC converter, ultracapacitor, accumulator

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Konstrukce olověného akumulátoru</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 2 Konstrukce prizmatického Li-ion článku</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3 Konstrukce spirálového Li-ion článku</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4 Řez ultrakapacitorovým článkem</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5 Průběhy úbytku napětí ultrapacitoru v závislosti na teplotě</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6 Blokové schéma HB</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7 Schéma zapojení UCAP baterie</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 8 Blokové schéma inteligentní baterie</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 Schéma snižujícího (buck) měniče</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 Schéma zvyšujícího (boost) měniče</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 11 Schéma snižujícího i zvyšujícího (buck/boost) měniče</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 12 Blokové schéma měniče hybridní baterie</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 13 Funkční schéma měniče ve startovacím režimu</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 14 Funkční schéma měniče v režimu dobíjení ultrakapacitoru</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 15 Simulační schéma HB ve startovacím režimu</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 16 Průběhy proudů ve startovacím režimu</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 17 Průběh poklesu napětí na UCAP při startu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 18 Průběh poklesu napětí na baterii při startu</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19 Simulační schéma HB v režimu dobíjení UCAP</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 20 Průběh napětí na UCAP v režimu dobíjení</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 21 Průběh proudu tekoucího ultrakapacitorem v režimu dobíjení</i>	<i>37</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Přehled parametrů běžně používaných akumulátorů.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 2 Porovnání některých vlastností zdrojů energie.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 3 Parametry navrhované koncepce HB.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4 Parametry ultrakapacitoru EPCOS B49300-A1605-Q000.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 5 Parametry Li-Pol článku PL-9759156-5C.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 6 Uvažované parametry měniče HB.....</i>	<i>28</i>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Použité symboly:

C_{UCAP}	Kapacita ultrakapacitoru	[F]
f_{sw}	Spínací frekvence	[Hz]
i_b	Proud baterie	[A]
I_{IN}	Vstupní proud	[A]
i_L	Proud indukčnosti	[A]
L	Indukčnost	[H]
R	Odpor	[Ω]
T_{sw}	Perioda spínání	[s]
t	čas	[s]
U_b	Napětí baterie	[V]
U_{IN}	Vstupní napětí	[V]
U_{Max}	Maximální napětí	[V]
U_{Min}	Minimální napětí	[V]
U_{OUT}	Výstupní napětí	[V]

Použité zkratky:

BMS	Battery Management System (manažment baterie)
D	Dioda
DC	Direct Current (jednosměrný proud)
EEPROM i po částech)	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (elektricky mazatelná paměť
HB	Hybrid Battery (hybridní baterie)
OVD	Overvoltage detector (přepět'ová ochrana)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
S	Spínač
SOC	State of Charge (stav nabití akumulátoru)
SOH	State of Health (stav opotřebení akumulátoru)
T	Tranzistor
UCAP faradů)	Ultracapacitor (elektrochemický dvojvrstvý kondenzátor s kapacitou řádově stovky

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
Úvod	12
1 Analýza vlastností dostupných akumulčních prvků pro využití v hybridních bateriích	13
1.1 Olověné akumulátorové baterie (Pb-PbO ₂)	13
1.2 Nikl – Kadmiové baterie (NiCd)	14
1.3 Nikl – metalhydridové baterie (NiMH)	14
1.4 Lithium-iontové baterie (Li-ion)	15
1.5 Lithium-polymerové baterie (Li-pol)	16
1.6 Ultrakapacitory (UCAP)	17
1.6.1 Možnosti použití ultrakapacitorů	20
1.6.2 Startování spalovacích motorů	20
1.6.3 Budoucnost ultrakapacitorů	20
2 Koncepční řešení hybridní baterie jako startovacího akumulátoru	21
2.1 UCAP baterie	23
2.2 Inteligentní baterie	24
2.3 DC/DC měnič	26
2.3.1 Obecná funkce DC/DC měničů	26
2.3.2 Snižující měnič „buck“ (step down)	26
2.3.3 Zvyšující měnič „boost“ (step up)	27
2.3.4 Zvyšující i snižující měnič (cuk)	27
2.3.5 Volba parametrů DC/DC měniče	28
3 Návrh a ověření vhodného schématu měniče hybridní baterie	29
3.1 Režim startování	30
3.2 Režim dobíjení ultrakapacitoru	31
4 Simulační model měniče	32
4.1 Simulace HB při startovacím režimu	33
4.2 Simulace HB v režimu dobíjení ultrakapacitoru	36

Úvod

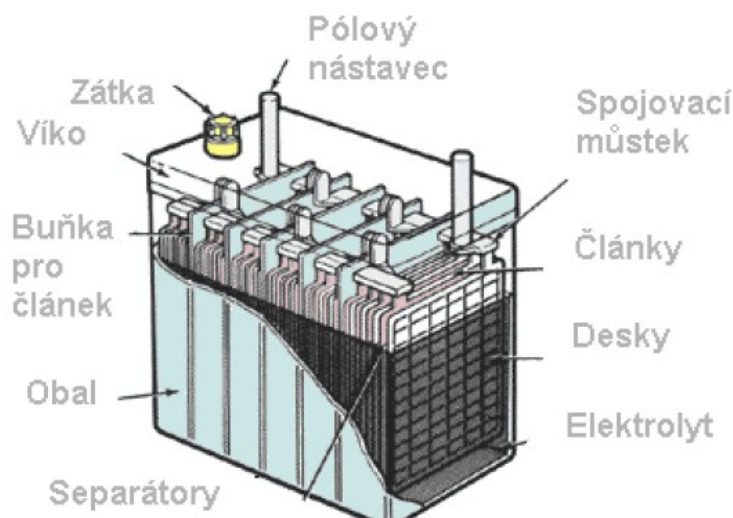
V současné době je akumulace elektrické energie doposud nedořešeným technickým problémem. Téměř každý elektronický systém je tvořen napájecím zdrojem. Mezi nejpoužívanější a nejběžnější zdroje elektrické energie patří už desítky let elektrochemické články nazývané také akumulátory. Současné typy akumulátorů mají spousty nedostatků, mezi něž patří zejména dlouhé nabíjecí časy, samovybíjení, teplotní závislost a nízká dynamika výstupního výkonu. Podrobným rozбором se jimi věnuje kapitola 1. Mezi největší pokrok za poslední stovky let se považuje vynalezení tzv. ultrakapacitoru (UCAP). Ultrakapacitory svými vlastnostmi převyšují současné akumulátory téměř ve všech oblastech. Jediným a hlavním nedostatkem ultrakapacitoru je momentálně jejich nízká energetická hustota na jednotku objemu. Podle dosavadních studií dojde v horizontu několika let k potlačení tohoto nedostatku. Dá se předpokládat, že se využití ultrakapacitorů bude stále rozšiřovat, ale momentálně vzhledem k již zmiňované nízké energetické hustotě je využití UCAP minimální. Proto se zrodila myšlenka spojit výhody současně nejlepšího elektrochemického zdroje s výhodami UCAP. Spojením těchto zdrojů elektrické energie vznikne hybridní typ napájecího zdroje zvaný hybridní baterie (HB). Hybridní baterie je složena z třech hlavních částí, které jsou rozebrány v dalších kapitolách. První část tvoří tzv. inteligentní baterie. Druhou část tvoří kaskádové zapojení DC/DC měniče. Poslední část tvoří UCAP baterie. Celá třetí kapitola této práce je věnována samotným návrhem schémata měniče hybridní baterie. Závěr práce tvoří ověření funkčnosti celé koncepce hybridní baterie v simulačním programu PS-Spice.

1 Analýza vlastností dostupných akumulčních prvků pro využití v hybridních bateriích

Akumulační prvek je technické zařízení na opakované uchovávání energie. Do tohoto zařízení je tedy nejprve nutné energii vložit, poté je možno teprve energii čerpat nazpět. Nejstarším a nejběžnějším typem akumulátoru jsou elektrochemické akumulátorové baterie. Pracují na elektrochemickém principu, tudíž procházející proud vyvolá vratné chemické změny, které se projeví rozdílným elektrochemickým potenciálem na elektrodách akumulátoru. Z elektrod se následně dá čerpat na úkor těchto změn elektrická energie zpět. Protože jsou napětí na článcích elektrochemických baterií relativně malá (okolo 1,2 – 3,7V), jsou tyto články sdružovány do sériových zapojení pro dosažení vyššího napětí. Pro využití v praxi se elektrochemické akumulátory vyznačují nízkým měrným výkonem a dlouhými nabíjecími časy způsobenými zdlouhavou elektrochemickou přeměnou. V současné době máme možnost výběru z více druhů elektrochemických akumulátorových baterií. V následující části si uvedeme jedny z nepoužívanějších typů elektrochemických akumulátorových baterií.

1.1 Olověné akumulátorové baterie (Pb-PbO₂)

Tento typ baterie vznikl přibližně v roce 1850. Díky své jednoduchosti byly tyto baterie masově produkovány a jsou tudíž nejrozšířenějším typem baterií. Omezení olověného akumulátoru spočívá v tom, že v případě setrvání po delší dobu ve stavu i částečného vybití, dochází na elektrodách k prakticky nevratným změnám tzv. sulfataci, která výrazně snižuje kapacitu baterie. Nejnovějším typem jsou ventilem řízené olověné baterie (VRLA). Jedná se o zapouzdřené akumulátory se zamezením ztrát elektrolytu. Jedním z typů této baterie je typ, kde je elektrolyt zahuštěn do formy gelu, tzv. gelové olověné baterie. Konvenčně vyráběné olověné baterie jsou konstruovány na vysoký výkon (více než 750 W/kg) a jsou často upřednostňovány z důvodu své nízké výrobní ceny, poměrně vysoké bezpečnosti a v neposlední řadě spolehlivosti. Nevýhodami těchto baterií je nízká měrná energie (30 až 50 W/kg), malý výkon za nízkých teplot a malá životnost. Účinnost ukládání energie se pohybuje nad 80%. Tento druh baterie se nehodí pro využití v hybridních vozidlech a to ze zásadního důvodu, kdy při dobytí jakéhokoli množství energie, proběhne jeden dobíjecí cyklus baterie. Takovýchto cyklů vykoná hybridní vozidlo za den mnoho, a proto by životnost olověného akumulátoru dosahovala velmi krátké doby [1, 3].



Obrázek 1 Konstrukce olověného akumulátoru

1.2 Nikl – Kadmiové baterie (Nikd)

Nikl-kadmiové baterie jsou používány v mnoha elektrických zařízeních, přestože byly vyvíjeny pro automobilové použití. Mají vyšší měrný výkon (45 až 100 Wh/kg) a delší životnost, než olověné akumulátory. Mezi hlavní nevýhody patří velká zátěž pro životní prostředí dána obsahem kadmia, které je toxické a je zapotřebí ho recyklovat, což má nepříznivý dopad na pořizovací cenu. Dalším problémem nikl-kadmiové baterie je vysoká hodnota samovybíjení, která dosahuje hodnoty až 24% své kapacity za měsíc. Samovybíjení není hlavním výběrovým kritériem pro návrh hybridní baterie. Nepříjemným aspektem nikl-kadmiových baterií je jejich paměťový efekt. Ten se vyznačuje tím, že pokud se dobíjí zcela nevybitá baterie, tak se energetická kapacita baterie snižuje. Je tedy zapotřebí příležitostně tuto baterii zcela vybit [3].

1.3 Nikl – metalhydridové baterie (NiMH)

NiMH baterie jsou běžně používané ve spotřební elektronice a patří k nejčastěji používaným typům elektrochemických akumulátorových baterií. Některé typy těchto baterií jsou používány v elektromobilech a dříve také v hybridních automobilech společnosti Honda a Toyota. Měrný výkon je srovnatelný s nikl-kadmiovými bateriemi, avšak měrná energie je vyšší (60-150 Wh/kg). Rychlost nabíjení je ve srovnání s nikl-kadmiovými bateriemi nižší, avšak u trakčních baterií určených pro hybridní vozidla bylo dosaženo akceptovatelných hodnot. Dalším nedostatkem je zvýšená teplotní citlivost, což je problém trakčních baterií určených pro hybridní vozidla. Řeší se to použitím teplotní diagnostiky. Dále v porovnání s NiCd bateriemi jsou baterie NiMH výrazně méně náchylné k paměťovému efektu, ale stále nedosahují v této oblasti vlastností olověných baterií. Negativním jevem je vysoké procento samovybíjení, dosahující hodnoty až 30% své kapacity za měsíc. Recyklovatelnost NiMH baterií je mnohem lepší než u NiCd baterií. Hlavním problémem NiMH baterií je stejně jako u NiCd baterií jejich vysoká pořizovací cena [3].

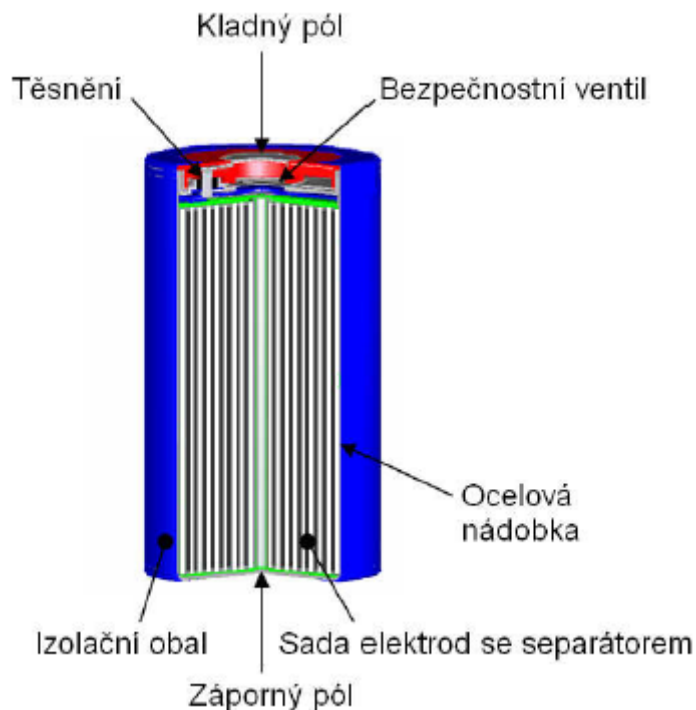
1.4 Lithium-iontové baterie (Li-ion)

Lithium-iontové (Li-ion) baterie jsou v současné době jedny z nejpoužívanějších zdrojů energie v přenosných zařízeních běžné spotřební elektroniky. Mezi největší výhody se řadí vysoké napětí článku okolo 3,7 V a jejich vysoká měrná energie běžně 180 Wh/kg. Další výhodou těchto baterií je bezesporu nízká hodnota samovybití (do 5 % za měsíc) a absence paměťového efektu. Mezi hlavní nedostatky patří rychlé stárnutí (ztráta maximální kapacity) nehledě na to, jestli je nebo není používána. Rychlost tohoto stárnutí se zvyšuje s vyšší teplotou, vyšším stavem nabití, a vyšším vybíjecím proudem či zatížením. Při úplném vybití, když napětí klesne pod 2 V, je velmi těžké ji znovu obživit. Baterie se dodávají v prizmatickém (Obr. 2) nebo ve spirálovém (Obr. 3) provedení.



Obrázek 2 Konstrukce prizmatického Li-ion článku

Elektrody těchto článků jsou velice tenké (kolem 200 μm) a jsou z tzv. interkalačních sloučenin (sloučeniny, které mohou do své krystalové mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu, většinou lithium). Každá Li-ion baterie kromě konstrukčních prvků se skládá ze tří částí: kladné, záporné elektrody a iontově vodivého elektrolytu. Obě elektrody jsou tvořeny tzv. interkalačními hostitelskými látkami, zejména lithia, v nichž elektrochemická reakce probíhá pouze jako vkládání respektive odjímání již zmíněných iontů lithia ze struktury prvku, což znamená vkládání nebo odejímání z jednotlivých materiálů respektujících kladnou a zápornou elektrodu.



Obrázek 3 Konstrukce spirálového Li-ion článku

Li-ion baterie jsou složeny z článků, které používají lithiovou interkalaci složenou z materiálů pro kladné a záporné elektrody. Pro kladnou elektrodu se nejčastěji používá materiál oxid kovu s vrstevnatou strukturou, takovou jako oxid lithia a kobaltu (LiCoO_2) známý jako kobaltitan lithný nebo materiál s tunelovou strukturou, například jako oxid lithia a manganu (LiMn_2O_4) obsažený na příslušném kolektoru, který pokrývá hliníková fólie. Pro zápornou elektrodu se nejvíce používá grafit (uhlík), nebo také vícevrstvý materiál, opět nanesen na kolektoru. V nabíjecím a vybíjecím procesu, ionty lithia jsou vloženy nebo vytáhnuté od intersticiálního (vsunutého) prostoru mezi atomovými vrstvami uvnitř aktivních materiálů.

1.5 Lithium-polymerové baterie (Li-pol)

Lithium-polymerové akumulátory umožňují dosáhnout ještě větší energetické hustoty v článku než Li-Ion a mají lepší vlastnosti, zejména vnitřní odpor a větší poměr kapacity/váha. Lithium-polymerové články jsou schopné dávat proudy desítek ampér. Základní parametry jsou stejné jako u Li-Ion, nominální napětí článku je 3,7 V. Tyto články však rychleji degradují a umožňují menší počet nabíjecích cyklů a jejich výrobní cena je vyšší. Nevýhodou těchto baterií je nutnost používání elektronické ochrany jednotlivých článků při nabíjení a vybíjení. Při jejich nabíjení a vybíjení nesmí být překročeny výrobcem stanovené hodnoty, v opačném případě dojde k poškození článků takzvanému nafouknutí. Toto poškození je ve většině případů nevratné a proto je při nabíjení Li-Pol akumulátorů třeba používat pouze nabíječky, které jsou pro tyto články určeny. Jednou z nevýhod těchto akumulátorů je jejich křehkost a "zranitelnost". Obal článku je tvořen kovovou fólií, která je minimálně mechanicky odolná, díky tomu nemusí být použit pojistný ventil jako u Ni-xx článků, ale při jejím poškození hrozí nebezpečí požáru a otravy expandujícími plyny které jsou navíc silně hořlavé. Baterie obsahuje pevný polymer jako elektrolyt, anoda je z kovu lithia a katoda je

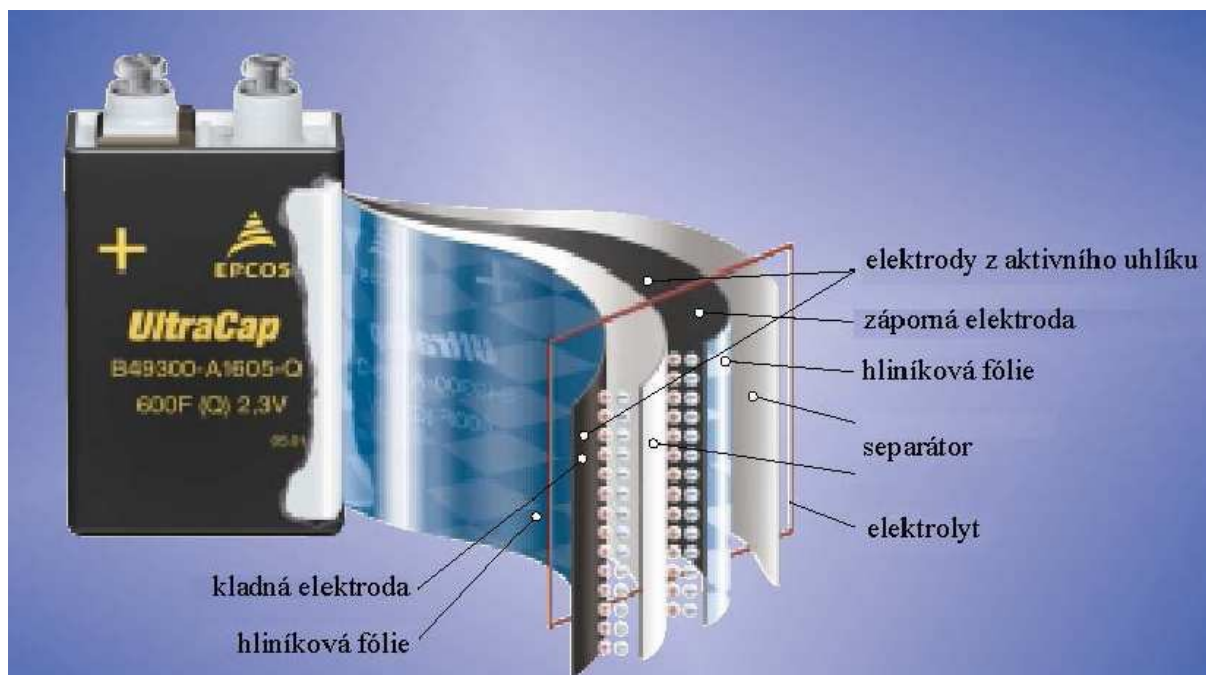
z kompozitu kysličníku vanadia. Tyto vrstvy se skládají na sebe, a buďto se rolují, nebo se vrství kladením na sebe. Tak lze dosáhnout téměř libovolných tvarů. Na stejnou kapacitu baterie Li-Pol si vystačíme s třetinovou váhou, než u Li-Ion baterií.

Tabulka 1 Přehled parametrů běžně používaných akumulátorů

Technologie: Parametr:	Pb	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol
Specifická hustota energie:	40 Wh/kg	70 Wh/kg	100 Wh/kg	180 Wh/kg	250 Wh/kg
Volumetrická hustota energie:	50 Wh/l	100 Wh/l	150 Wh/l	250 Wh/l	330 Wh/l
Vybíjecí proud:	< 5C	< 30 C	< 20 C	< 20 C	45 / 60 C
Nabíjecí proud:	< 1 C	1 - 5 C	1 - 2 C	1 C	1 - 6 C
Nominální napětí:	2V	1.2V	1.2V	3.6V	3.7V
Samovybíjení:	0.5 %/den	0.8 %/den	1 %/den	0.1 %/den	0.1 %/den
Nabíjení:	CC/CV	pulsně	pulsně	CV/CC	CV/CC
Počet cyklů:	500	1000	800	<1000	<1000

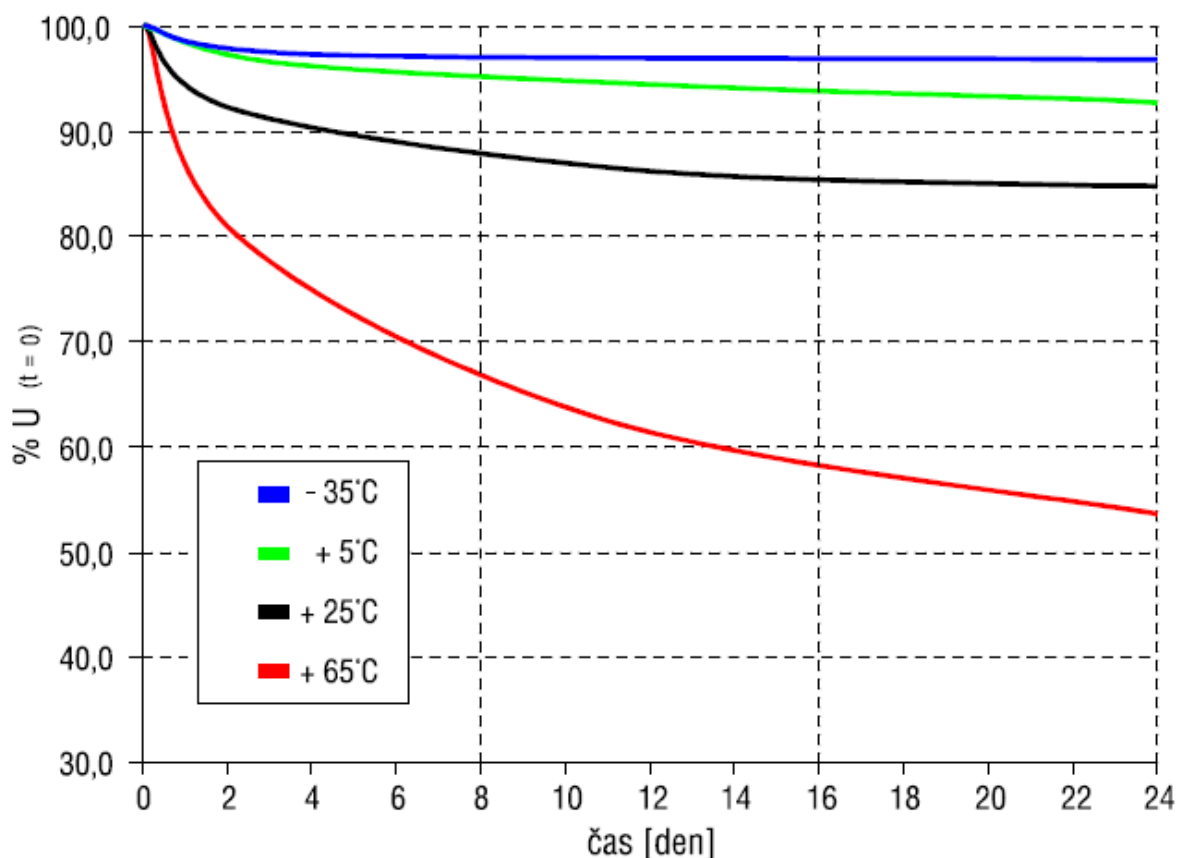
1.6 Ultrakapacitory (UCAP)

Ultrakapacitory, někdy také nazývané ultrakapacitory, jsou pasivní součástky pro akumulaci elektrické energie, které jsou při srovnatelném objemu či hmotnosti akumulovat podstatně více energie, než klasické kondenzátory, ale zároveň méně, než obvyklé akumulátorové baterie. Princip uchování energie v ultrakapacitoru vychází z efektu, který popsal již v roce 1856 K. Hemholtz. Jedná se o vytvoření elektrochemické dvouvrstvy po přiložení napětí na elektrody ponořené ve vodivé tekutině. Proto je ultrakapacitor někdy také nazýván elektrochemickým dvouvrstvým kondenzátorem. Stejně jako u běžného kondenzátoru je zde energie uchovávána v elektrostatickém poli. V nenabitém stavu jsou částice s nenulovým nábojem (ionty) rovnoměrně rozloženy ve vodivé tekutině, elektrolytu, který se nachází mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a naopak kladné ionty k záporné elektrodě. Na obou elektrodách se tak vytvoří dvouvrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Použitelné napětí je omezeno hodnotou disociačního napětí, při kterém jsou náboje z elektrod schopny přejít k iontům v elektrolytu. Při vyšším než disociačním napětí dochází k chemickým reakcím, které vedou k vývinu vzduchu a následnému zničení kondenzátoru. U elektrolytů na bázi vody je tato napěťová hranice 1,2 V, zatímco u elektrolytů na bázi organických rozpouštědel se tato napěťová hranice pohybuje mezi 2-3 V.



Obrázek 4 Řez ultrakapacitorovým článkem

Na obr. 4 je zobrazen řez ultrakapacitoru, který má parametry 600 F / 2,3 V s rozměry 4 x 6 x 9 cm a váží pouze 290 g. Vysoké kapacity je dosahováno použitím elektrod z vysoce porézního uhlíku s velkým povrchem (až 2000 m².g⁻¹). Elektrody ultrakapacitoru jsou tvořeny paralelním propojením porézních uhlíkových plátek, které jsou ponořeny do vodivého organického elektrolytu. Elektrické připojení je realizováno spojením hliníkové fólie s uhlíkovým plátkem. Mezi jednotlivými elektrodami jsou tenké separátory z papíru, polymerů nebo skleněných vláken. U ultrakapacitoru se energie neuchovává přeměnou chemických vazeb, jak tomu bylo u baterií, ale dochází zde jen k posuvu iontů v elektrickém poli. U elektrod nedochází při nabíjení a vybíjení k žádné látkové přeměně, což má za následek vysokou životnost a velký počet cyklů nabíjení/vybíjení. Velkou výhodou ultrakapacitorů je bezesporu velký teplotní rozsah, u kterého nedochází ke změně elektrických vlastností ultrakapacitoru [4].



Obrázek 5 Průběhy úbytku napětí ultrapacitoru v závislosti na teplotě

Tabulka 2 Porovnání některých vlastností zdrojů energie

Charakteristika	olověný akumulátor	běžný kondenzátor	ultrakapacitor
Doba nabíjení	(1 - 5) h	$(10^{-3} - 10^{-6})$ s	(0,3 - 30) s
Doba vybíjení	(0,3 - 3) h	$(10^{-3} - 10^{-6})$ s	(0,3 - 30) s
Měrná hustota energie	$(10 - 100) \text{ Wh.kg}^{-1}$	$< 0,1 \text{ Wh.kg}^{-1}$	$(1 - 10) \text{ Wh.kg}^{-1}$
Životnost	1000 cyklů	$> 500\,000$ cyklů	$> 500\,000$ cyklů
Účinnost cyklu nabití/vybití	(70 - 85)%	$> 95\%$	(85 - 98)%
Měrný výkon	$< 1 \text{ kW.kg}^{-1}$	$< 100 \text{ kW.kg}^{-1}$	$< 10 \text{ kW.kg}^{-1}$

U ultrakapacitoru bylo dosaženo několikanásobně vyšší kapacity, oproti běžným kondenzátorům. Avšak v porovnání se současnými akumulátory je to pořád málo. Ultrakapacitor má však na rozdíl od běžně dostupných akumulátorů řadu výhod, které jsou uvedeny v Tab. 2. Mezi největší výhodu patří schopnost akumulace elektrické energie bez její další přeměny (nedochází k žádným chemickým reakcím). Mohou se pyšnit vyšší životností a dynamikou než je tomu u akumulátoru.

1.6.1 Možnosti použití ultrakapacitorů

Ultrakapacitory jsou velký a rychlý zásobník elektrické energie, který je schopen zpracovat velké vybíjecí a nabíjecí proudy. Navíc má široký rozsah pracovních teplot. Možností jejich použití je tedy celá řada například pro startování spalovacích motorů, elektromobily, hybridní vozidla a další aplikace.

1.6.2 Startování spalovacích motorů

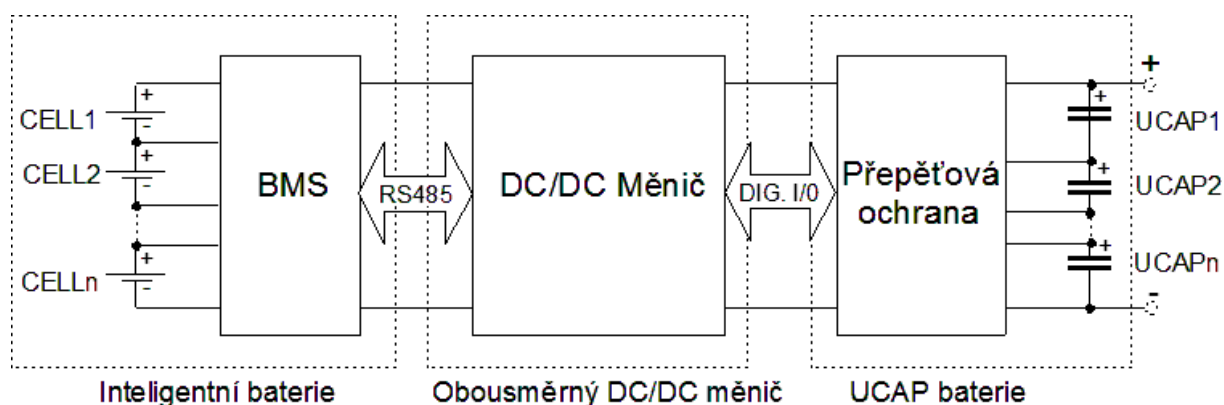
Akumulátor pro konkrétní spalovací motor není vybírán jen podle své kapacity, ale hlavně podle schopnosti dodat patřičný proud pro start. Při běžném startu se využije jen malá část kapacity akumulátoru. Při nízkých teplotách pod bodem mrazu se pak parametry běžných akumulátorů zhoršují. Ultrakapacitory jsou schopny pokrýt prvotní proudovou špičku a podle konstrukce případně i celou energii potřebnou pro nastartování spalovacího motoru. Může být využito energie v ultrakapacitorech uloženou z předchozí jízdy. V případě neúspěšného startu je možné ultrakapacitor nabít malým proudem z akumulátoru. Tím se dosáhne nižší ztráty na vnitřním odporu akumulátoru, protože ty rostou spolu s rostoucím proudem akumulátoru.

1.6.3 Budoucnost ultrakapacitorů

Masová komerční výroba ultrakapacitorů začala nedávno, a z toho důvodu se situace na trhu s těmito součástkami neustále vyvíjí. Vzhledem ke zvyšující se produkci, můžeme očekávat i klesající ceny. Výrobci slibují postupný nárůst energetické hustoty ultrakapacitorů až na úroveň dnešních olověných akumulátorů. Můžeme předpokládat, že UCAP plně nahradí většinu dnešních akumulátorů. Na základě rozboru dostupných zdrojů elektrické energie zvolím nejvhodnější kombinaci prvků pro návrh koncepce hybridní baterie, kterou se věnuje následující část této práce [6].

2 Konceptní řešení hybridní baterie jako startovacího akumulátoru

Největší slabinou dnešních elektronických zařízení je právě jejich zdroj energie. Mezi zdroje energie patří sekundární elektrochemické články zvané akumulátory. Mezi hlavní omezení akumulátorů patří teplotní závislost. To znamená, že jmenovité parametry akumulátory se mění v závislosti na teplotě. Nejvíce se teplotní závislost projevuje na kapacitě článku, která klesá úměrně s teplotou. Pro příklad uvedu pokles kapacity až o 50 % své jmenovité hodnoty u 12 V olověné startovací baterie při $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento fakt můžeme zpozorovat v zimním období při startování automobilu. Doba nabíjení akumulátoru se pohybuje v řádu několika hodin. V dnešní době už existují rychle nabíječky, které dobu nabíjení eliminují na desítky minut, ale je to na úkor životnosti baterie. Dalším velkým problémem je nízká dynamika výstupního výkonu což znamená kolísání svorkového napětí v závislosti na intenzitě jeho zatížení. Další faktor, který má vliv na pokles dynamiky je stáří článku. Posledním problémem akumulátoru, který zde uvedu je jejich samovybití. Tento jev se podílí na celkové účinnosti, která klesá úměrně s délkou provozu na jedno nabití. Při dlouhodobém skladování ve vybitém stavu dochází mnohdy k nevratnému poškození, proto je důležitá pravidelná kontrola dobití akumulátoru. I přes všechny tyto nevýhody patří akumulátory mezi nejlepší zdroje elektrické energie. Největším momentálním pokrokem ve vědě v oblasti zásobníků elektrické energie jsou ultrakapacitory (UCAP). Hlavní rozdíl mezi ultrakapacitorem a akumulátorem spočívá v principu skladování elektrické energie. U akumulátoru se k uskladnění elektrické energie využívá chemických procesů, u UCAP není třeba pro uskladnění elektrické energie chemických reakcí. Elektrické, ale i mechanické vlastnosti UCAP mnohonásobně převyšují vlastnosti akumulátoru. Mezi největší přednosti patří vysoká dynamika, delší životnost, velký teplotní rozsah. Jediným nedostatkem UCAP je poměrně nízká energetická hustota na jednotku objemu. Tento problém by se však měl v budoucnu eliminovat. Nejnovější studie slibují zvýšení energetické hustoty na úroveň dnešních Li-Ion akumulátorů. Zatím však vzhledem k vysokým technickým a finančním nárokům jsou nerealizovatelné. Základní myšlenkou jak odstranit nedostatky dosavadních zdrojů elektrické energie je sloučení UCAP a akumulátoru, čímž můžeme nedostatky jednotlivých zdrojů energie eliminovat a vytvořit tak téměř ideální zásobník elektrické energie nazvaný hybridní baterie (HB). Dosáhneme tak poměrně vyšší dynamiku a vysokou energetickou hustotu. V principu půjde o kaskádní propojení běžného akumulátoru s ultrakapacitorem prostřednictvím obousměrného DC/DC měniče. Statické parametry HB budou dány typem akumulátoru a dynamické kapacitou UCAP. Za předem definovaných podmínek má DC/DC měnič za úkol zprostředkování přenosu elektrické energie v obou směrech mezi akumulátorem a UCAP, udržet konstantní napětí na ultrakapacitoru, díky kterému bude dosaženo vysoké dynamiky HB po dobu celé provozní doby akumulátoru. Mezi předem definované podmínky patří proudové omezení mezní hodnoty dovolených nabíjecích a vybíjecích proudů akumulátorů. Koncepte hybridní baterie je znázorněna na Obr. 6.



Obrázek 6 Blokové schéma HB

Koncepce HB je sestavena z třech hlavních částí, které popíšu v dalších kapitolách. Než začnu s popisem jednotlivých částí, je zapotřebí stanovit základní parametry HB. Ty vychází ze samotného využití hybridní baterie. V našem případě se bude jednat o využití HB jako startovací akumulátor. U tohoto druhu uplatnění HB je zapotřebí pokrýt vysoké výkonové požadavky. Při startu automobilu odebírá startér z akumulátorů až stovky ampér po dobu jednotek sekund. A právě v této fázi by bylo možno využít energie obsažené v UCAP, která je součástí HB a docílit tak snížení vysokého proudového zatížení akumulátoru. To nám zvýší celkovou dynamiku vstupně - výstupního výkonu a celkově prodlouží životnost akumulátoru. Pro konkrétní návrh parametrů HB budeme vycházet z následujícího příkladu. Předpokládejme, že start automobilu trvá 2,5 sekundy a odběr proudu z baterie, který odebírá startér je 250 A. Provozní napětí akumulátorů je v rozmezí od 8–14,4 V, při delším startování převážně v zimním období může napětí akumulátoru klesnout až na 8 V. Z těchto parametrů budeme vycházet pro výpočet velikosti minimální kapacity UCAP.

$$C_{UCAP} = \frac{I * t}{U_{Max} - U_{Min}} = \frac{250 * 2,5}{14,4 - 8} = 98F / 14,4V \quad (1)$$

Na základě uvedených předpokladů si stanovíme výchozí parametry HB, z kterých budeme dále vycházet.

Tabulka 3 Parametry navrhované koncepce HB

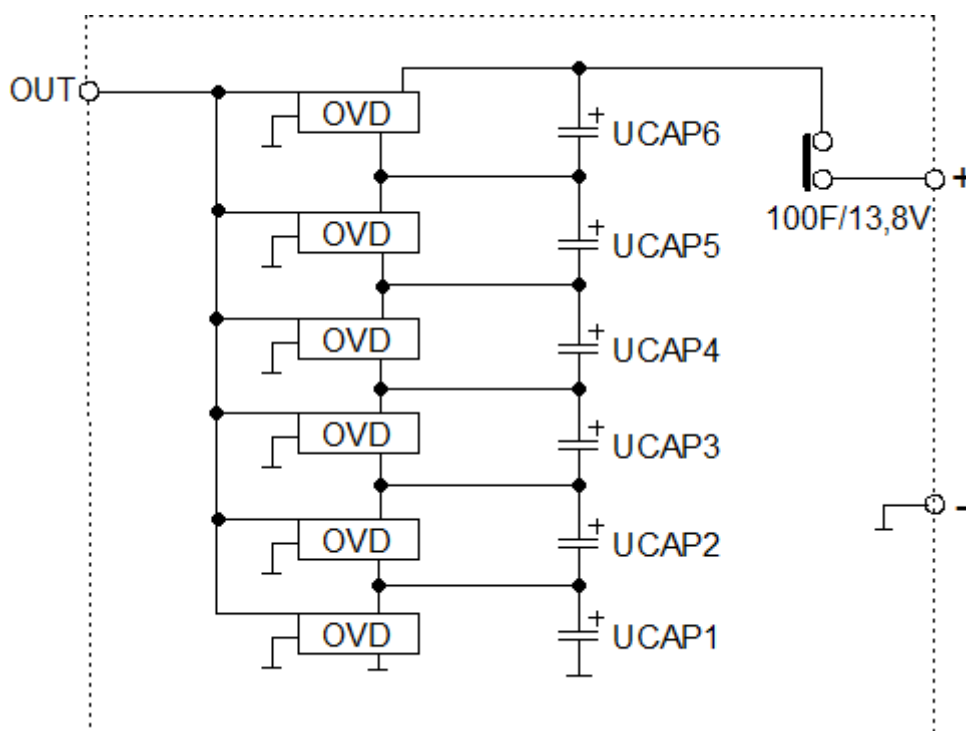
Parametr	Hodnota
Napětí akumulátoru	14,4 V
Nominální napětí HB	12 V
Nominální proud akumulátoru	10 A
Maximální proud akumulátoru	50 A
Kapacita UCAP baterie	100 F

2.1 UCAP baterie

Pro výběr vhodného ultrakapacitoru máme dva požadavky, které by měl splňovat. Prvním je dosažení nominálního napětí 14 V a druhým je kapacita UCAP baterie 98 F. Z běžně dostupných typů UCAP se naše požadavky nejvíce shodují s ultrakapacitorem B49300-A1605-Q000. Tento ultrakapacitor je od firmy EPCOS a jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.

Tabulka 4 Parametry ultrakapacitoru EPCOS B49300-A1605-Q000

Parametr	Hodnota
Nominální kapacita	600 F
Nominální napětí	2,3 V
Provozní teplota	-30 až + 70°C
Svodový proud	2 mA
Energetická hustota	1,52 Wh/kg
Sériový odpor AC	2 mΩ
Sériový odpor DC	3,4 mΩ
Rozměry v.š.h (mm)	91x61x33
Váha	290 g



Obrázek 7 Schéma zapojení UCAP baterie

Na Obr. 7 máme znázorněné schéma zapojení UCAP baterie. Schéma obsahuje šest sériově zapojených ultrakapacitorů B49300-A1605-Q000 a obvody zajišťující detekci přepětí na UCAP

značené (OVD – overvoltage detektor). Ultrakapacitory trpí nízkým rozsahem provozního napětí, jeho překročením může dojít až k nevratnému poškození. Rozsah nominální hodnoty kapacity je u tohoto typu ultrakapacitoru s tolerancí -10 až +30%, což může mít za následek nerovnoměrné rozložení napětí na jednotlivých ultrakapacitorech znázorněných ve schématu. U UCAP s nejnižší kapacitou může dojít ke vzniku přepětí, proto je zapotřebí tento problém odstanit. Jedním z možných řešení je použití obvodu detekující přepětí na UCAP.

2.2 Inteligentní baterie

Díky svým parametrům je nejvhodnější pro návrh HB použití lithiového akumulátoru. Výběr samotných článků pro dané použití je podmíněno výchozími parametry HB, které jsou uvedeny v Tab. 3. Jmenovitá hodnota napětí by měla mít hodnotu 12V a celková kapacita baterie by měla být 10Ah. Na základě těchto parametrů volíme článek Li-Pol PL-9759156-5C, jehož parametry zobrazuje Tab. 5.

Tabulka 5 Parametry Li-Pol článku PL-9759156-5C



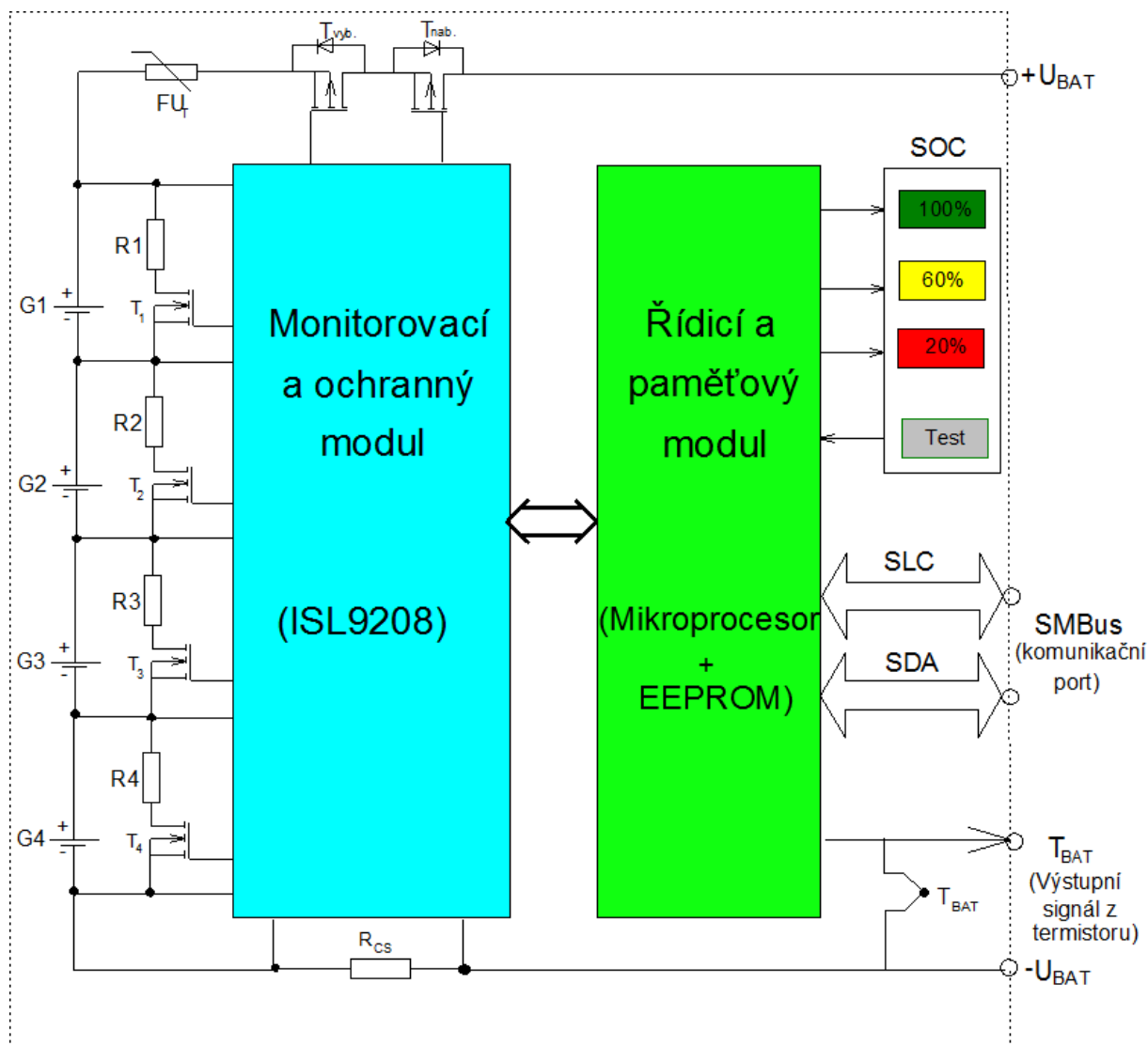
Parametr	Hodnota
Nominální kapacita	10100mAh
Nominální napětí	3,7 V
Maximální vybíjecí proud	50 A (5 C)
Maximální vybíjecí proud	5 A (0,5 C)
Energetická hustota	171 Wh/kg
Provozní teplota	-10 až +60°C
Hmotnost	210 g
Rozměry v.š.h (mm)	157x59,5x9,8

Baterie se skládá ze 4 sériově řazených článků PL-9759156-5C a jejich výsledné jmenovité napětí je 14,8 V což odpovídá našim stanoveným 12 V.

Vzhledem k tomu, že Li-Pol články disponují tak jako ultrakapacitory malým rozmezím provozního napětí a jeho překročení může článek trvale poškodit, či úplně zničit, je potřeba tomu předejít. To se dá za pomoci integrování přídavné elektroniky, která se nazývá management baterie (BMS). Základní úlohou BMS je ochrana článku před nesprávným nabíjením či vybíjením, prodloužení celkové životnosti, udržení akumulátorů ve stavu, kdy je schopen plnit dané požadavky aplikací, pro které byl určen. Složení funkčních bloků BMS se různí a je dáno aplikací, pro kterou je určen. Existuje hned několik dalších funkčních bloků, které mají specifikovanou funkci. Můžeme je rozdělit z funkčního hlediska na:

- kontrola nabíjení akumulátoru
- informace o napájení aplikace
- aktuální hodnota kapacity akumulátoru
- úroveň opotřebení akumulátoru
- ochrana článku
- monitorování událostí
- archivace událostí

Podrobný rozbor jednotlivých bloků není tématem této práce, proto je dále nebudu rozebírat. Na Obr. 9 je uvedeno blokové schéma zapojení inteligentní baterie.



Obrázek 8 Blokové schéma inteligentní baterie

Řídicí a paměťový modul zabezpečuje ostatní funkce BMS, mezi které patří například stanovení úrovně nabití akumulátoru (SOC), stanovení úrovně opotřebení akumulátoru (SOH), uchování naměřených údajů, identifikace atd. Složení řídicího a paměťového modulu může být tvořeno dvojím způsobem a to buď mikroprocesorem a pamětí EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) nebo integrovaným obvodem. Monitorovací a ochranný modul dohlíží na správný provoz jednotlivých článků. Pokud dojde k odchýlení předem definovaných parametrů, regulační obvod vykoná příslušný zásah a snaží se odchylku eliminovat. Jeho hlavní funkcí je tedy napěťová bilance a ochrana článků. Jako součástka, která slouží k monitorování a ochraně baterie se používá integrovaný obvod například ISL92xx [7].

2.3 DC/DC měnič

DC/DC měnič (stejnoseměrný měnič) představuje elektronický měnič, který se stará o změnu stejnosměrného proudu či napětí mezi dvěma různými stejnosměrnými napájecími soustavami. Pracuje na principu spínaného zdroje, čímž dosahuje vysoké účinnosti (až 95%), což je v porovnání s lineárními stabilizátory téměř dvakrát více. Díky vysoké účinnosti jsou tyto zdroje ideální v zařízeních, která jsou napájena z baterie, protože se tím výrazně prodlužuje její výdrž. Tímto způsobem lze stejně jako u lineárních zdrojů napětí snižovat, ale na rozdíl od nich i zvyšovat. Hlavním úkolem DC/DC měniče je zprostředkování přenosu elektrické energie mezi akumulátorem a ultrakapacitorem za předem definovaných podmínek. Jednou z hlavních podmínek je udržení konstantního výstupního napětí po dobu jeho změny. Mezi hlavní požadavky pro výběr vhodného DC/DC měniče patří:

- vysoká účinnost (> 90%)
- obousměrný přenos elektrické energie
- co nejjednodušší zapojení
- malé rozměry a nízká hmotnost

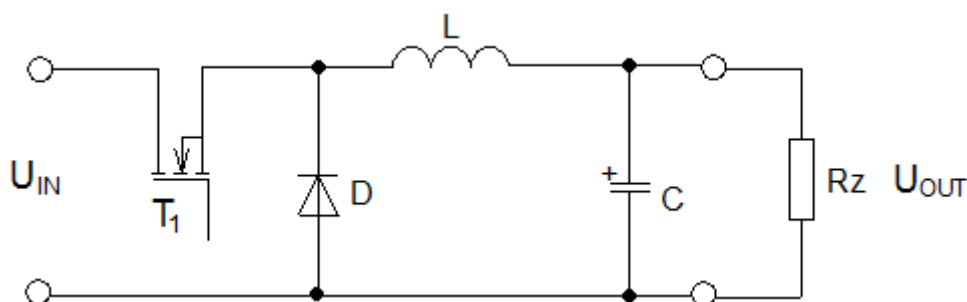
2.3.1 Obecná funkce DC/DC měničů

Základním principem funkce DC/DC měničů je dočasné ukládání energie na vstupu a její následné přenesení na výstup měniče. K uchování elektrické energie se používají cívky, transformátory, kondenzátory. Měniče, které používají k ukládání energie cívku nebo transformátor, periodicky ukládají energii do jejich magnetického pole a pak ji uvolňují s frekvencí v rozsahu 30kHz až 1MHz. Změnou střídavého napětí je možné množství této energie regulovat, čímž dojde k úpravě výstupního napětí. V případě použití transformátoru na rozdíl od cívky je možné galvanické oddělení vstupu a výstupu. Při použití kondenzátoru jako zásobníku elektrické energie pracují DC/DC měniče na principu jejich střídavého přepojování mezi vstupem a výstupem v různých topologiích. Například je možné tyto kondenzátory nabíjet v sérii, ale energii z nich odebírat paralelně. Tím se sice sníží výstupní napětí, ale zvýší se dodávaný proud. Tranzistory a diody slouží u DC/DC měničů ke spínání.

Mezi základní typy zapojení DC/DC měničů se řadí: Snižující měnič „buck“ (Obr. 9), Zvyšující měnič „boost“ (Obr. 10) nebo Zvyšující-snižující měnič „cuk“ (Obr. 11) [2, 8].

2.3.2 Snižující měnič „buck“ (step down)

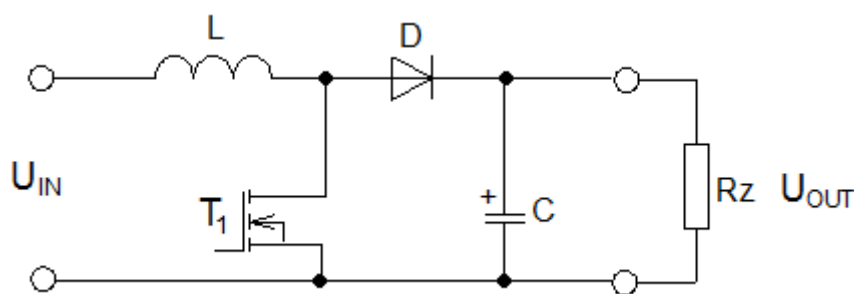
Na Obr. 9 je znázorněno schéma zapojení neizolovaného snižujícího měniče. Při sepnutí tranzistoru T_1 teče proud do zátěže přímo ze zdroje U_{IN} přes cívku L . Při rozepnutí T_1 se zdrojem napětí stane cívka L a proud do zátěže se uzavírá přes diodu D . V případě sepnutí T_1 se cívka chová jako spotřebič a napětí na ní je ve stejném smyslu jako protékající proud. Ve druhém případě se cívka chová jako zdroj, proud má stejný směr, ale napětí obrací polaritu. Maximální napětí na výstupu je rovno vstupnímu napětí. Při sepnutém stavu tranzistoru T_1 roste napětí na výstupu a kondenzátor C se nabíjí. Při rozepnutém stavu tranzistoru T_1 se kondenzátor C začne vybíjet přes zátěž a podpoří tak proud tekoucí do zátěže z cívky. Mezi největší výhody tohoto zapojení patří nízká cena a jednoduchost zapojení. Mezi nevýhody se řadí omezený rozsah výkonů a galvanické spojení vstupu s výstupem.



Obrázek 9 Schéma snižujícího (buck) měniče

2.3.3 Zvyšující měnič „boost“ (step up)

Na Obr. 11 je znázorněno základní schéma neizolovaného zvyšujícího měniče. Při sepnutí tranzistoru T_1 lineárně roste proud tekoucí cívkou L . Postupně dojde k akumulaci energie v magnetickém poli cívky, čímž se cívka začne chovat jako spotřebič. V tomto cyklu je energie do zátěže dodávána z kondenzátoru C , který je přes zátěž vybíjen a tím dojde k poklesu energie i na zátěži. Při rozepnutí tranzistoru T_1 protéká proud ze zdroje a z cívky L do zátěže. Cívka se začne chovat jako zdroj a navíc se dobíjí kondenzátor C a na něm i na zátěži roste napětí. Dioda D zabraňuje vybíjení kondenzátoru C přes tranzistor T_1 pokud je tranzistor sepnut. Hlavní výhodou tohoto zapojení je nízká cena a hlavně schopnost zvýšení výstupního napětí bez použití transformátoru. Nevýhodou je vysoká hodnota zvlnění výstupního signálu při nízkých hodnotách střídavého spínání tranzistoru T_1 [8, 9].

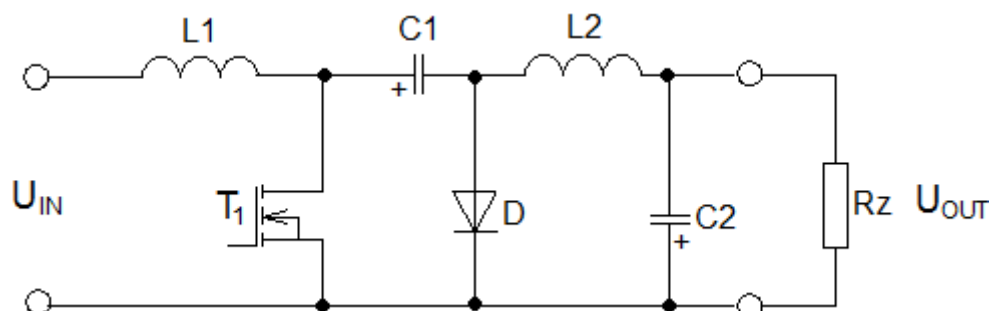


Obrázek 10 Schéma zvyšujícího (boost) měniče

2.3.4 Zvyšující i snižující měnič (cuk)

Tento typ měniče dokáže výstupní napětí snižovat i zvyšovat vůči vstupnímu napětí, jinak řečeno dokáže udržovat na výstupu konstantní úroveň napětí při kolísajícím napětí na vstupu. Na Obr. 11 je znázorněn „cuk“ měnič v neizolované podobě. Pokud přivedeme napájecí napětí U_{IN} , tak dojde k rozepnutí tranzistoru T_1 a proud začne protékat ze zdroje U_{IN} v sérii s cívkou L_1 jako zdrojem přes kondenzátor C_1 a diodu D zpět do zdroje. Dochází tak k nabíjení kondenzátoru C_1 na kladnou hodnotu napětí zdroje U_{IN}^+ . Postupně dochází k poklesu hodnoty proudu tekoucího přes cívku L_1 . V druhé fázi činnosti je tranzistor T_1 sepnut a tím začne protékat proud ze zdroje přes cívku L_1 (která je nyní spotřebičem) dále přes sepnutý tranzistor T_1 zpět do zdroje. Hodnota proudu cívkou se tak začne zvyšovat a tím je spojen kladný pól kondenzátoru C_1 se zemí přes tranzistor T_1 a kondenzátor C_1 se začne vybíjet přes kondenzátor C_2 a cívku L_2 . Dochází tím k nabíjení kondenzátoru C_2 . V třetí fázi činnosti obvodu dochází k rozepnutí tranzistoru T_1 , čímž se opakuje činnost z prvního cyklu s tím rozdílem, že v magnetickém poli cívky L_2 je uložena energie, která se při rozepnutí tranzistoru T_1

projeví pokračováním směru toku proudu při současném otočení polaroty napětí na cívce L_2 . Proud tedy protéká z cívky L_2 přes diodu D a zátěž R_Z zpět do cívky L_2 [8, 9].



Obrázek 11 Schéma snižujícího i zvyšujícího (buck/boost) měniče

2.3.5 Volba parametrů DC/DC měniče

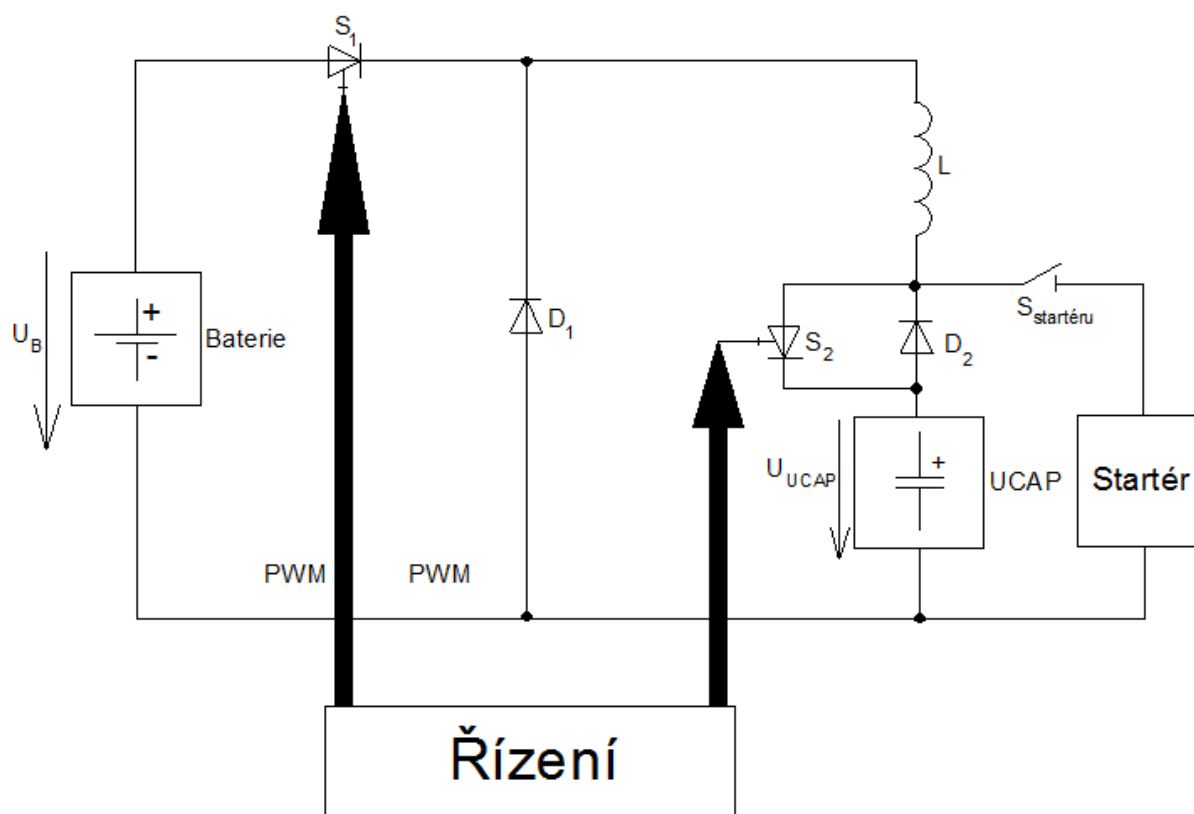
V popisovaném zapojení hybridní baterie plní DC/DC měnič funkci tzv. mezičlánku, jehož úkolem je zprostředkování toku elektrické energie mezi akumulátorem a ultrakapacitorem za předem stanovených podmínek, které jsou uvedeny v Tab. 6.

Tabulka 6 Uvažované parametry měniče HB

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí U_{IN}	12 -16 V
Výstupní napětí U_{OUT}	14 V
Spínací frekvence f_{sw}	50 kHz
Účinnost	>90%

3 Návrh a ověření vhodného schématu měniče hybridní baterie

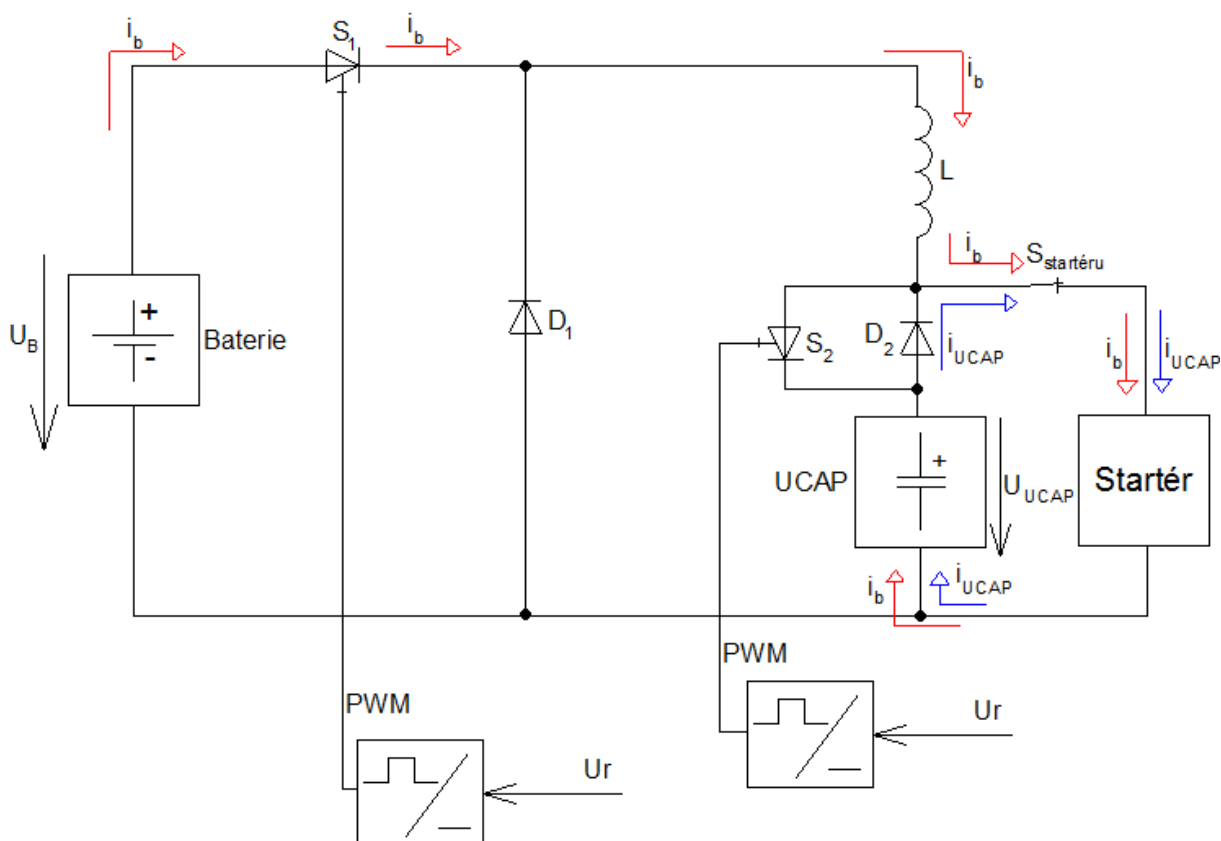
Základní popis DC/DC měničů byl rozebrán již v kapitole 2.3. Tato kapitola se zabývá návrhem vhodného schématu měniče a následným popisem jeho činnosti. Na Obr. 12 je znázorněno blokové schéma zapojení měniče hybridní baterie. Toto schéma vychází ze zapojení dvoukvadrantového měniče s reverzací proudu. Obvod měniče je sestaven tak, aby mohl pracovat ve dvou režimech. Popis funkce v jednotlivých módech je podrobně vysvětlen v následujících podkapitolách. Řízení spínačů je realizováno generátory pulsně šířkové modulace (PWM). Samotné schéma zapojení je tvořeno baterií, spínači S_1 a S_2 , oddělovacími diodami D_1 , D_2 a funkční součásti, kterou představuje indukčnost, ultrakapacitor a startér.



Obrázek 12 Blokové schéma měniče hybridní baterie

3.1 Režim startování

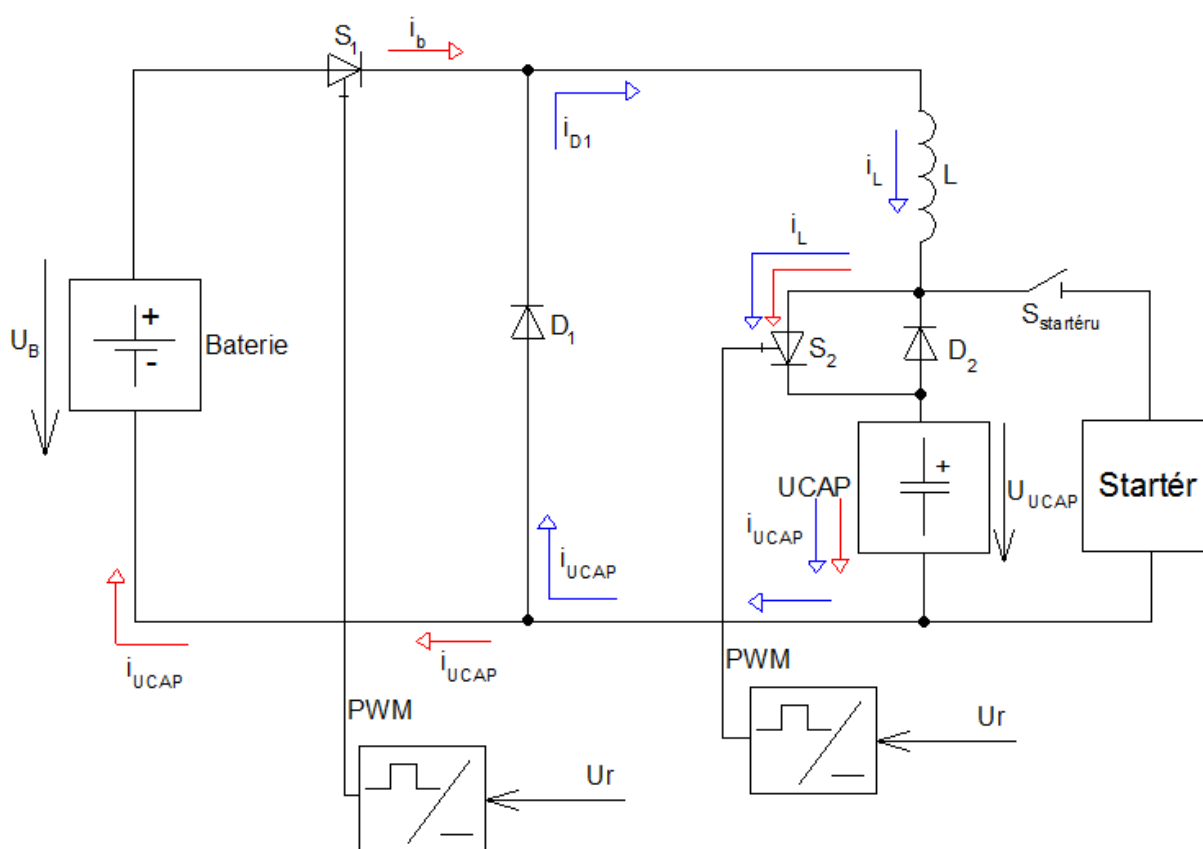
Základním požadavkem správné funkce startovacího režimu je mít sepnutý spínač startéru. Následně pomocí řízení je dán povel k rozepnutí spínače S_2 . Za předpokladu, že UCAP je plně nabit dojde k přenosu elektrické energie z UCAP přes diodu D_2 směrem do startéru. Jelikož má startér obrovský odběr proudu (v našem případě 250A) a UCAP není schopen pokrýt celou dobu startu takovým proudem, je potřeba dodat část elektrické energie z akumulátoru. Pomocí pulsního řízení přichází povel k sepnutí spínače S_1 , čímž začne protékat proud z baterie přes spínač S_1 dále do cívky, která zde slouží jako setrvačnost směrem do startéru. Tento proces je splněn pouze v případě, jestliže je na akumulátoru větší napětí než na ultrakapacitoru. Tento proces by neměl trvat déle než je doba startu.



Obrázek 13 Funkční schéma měniče ve startovacím režimu

3.2 Režim dobíjení ultrakapacitoru

Po úspěšném nastartování se nám rozpojí spínač startéru a nyní jsme ve fázi, kdy je potřeba dodat odčerpanou elektrickou energii zpět akumulátoru i ultrakapacitoru. O tuto funkci se stará alternátor, který není ve schématu znázorněn. Za předpokladu nabití akumulátoru na svou maximální hodnotu a sepnutého spínače S_2 dojde pomocí pulsního řízení k sepnutí spínače S_1 . Pokud je napětí na UCAP menší než je napětí na akumulátoru, tak dojde k procesu dobíjení ultrakapacitoru. Proud z baterie začne protékat přes sepnutý spínač S_1 dále do sepnutého spínače S_2 směrem přes UCAP zpět do záporného pólu akumulátoru. Jakmile dojde k nabití ultrakapacitoru na požadovanou hodnotu, tak je pomocí řízení dán povel k rozepnutí spínače S_1 , čímž se obvod uzavře přes diodu D_1 .



Obrázek 14 Funkční schéma měniče v režimu dobíjení ultrakapacitoru

4 Simulační model měniče

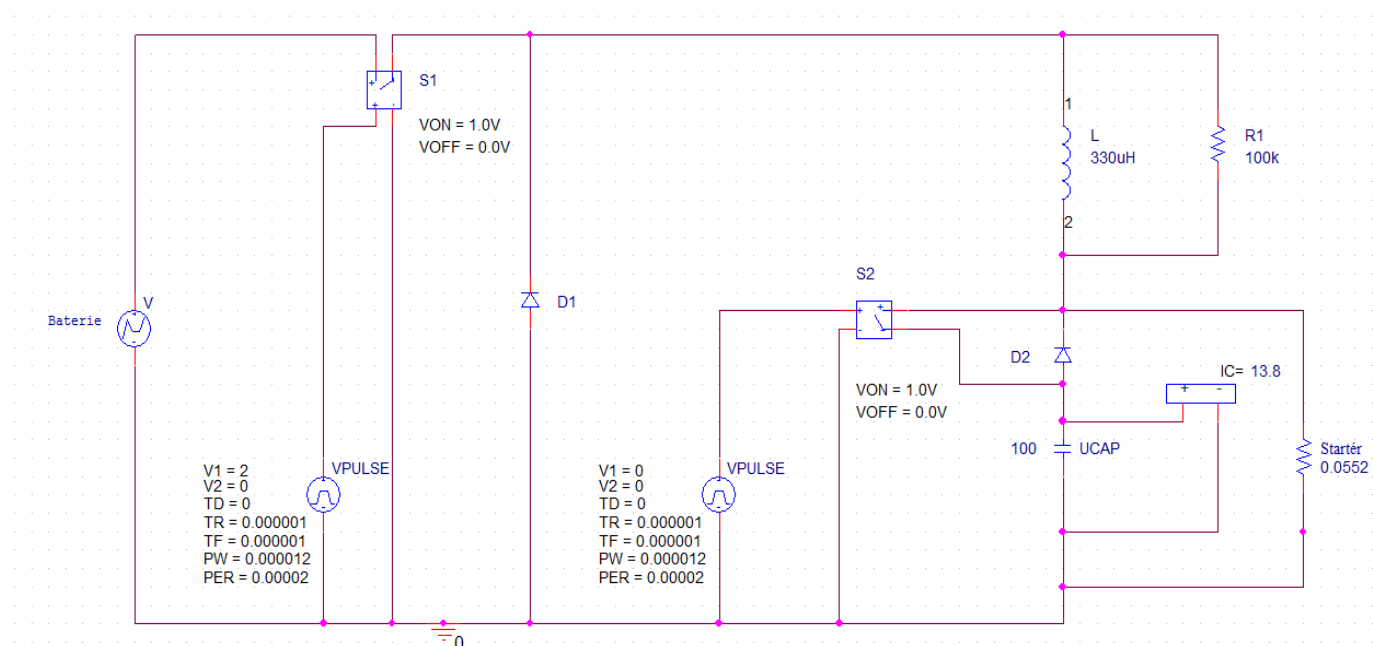
Pro samotnou simulaci navržené hybridní baterie jsem použil program Spice (Simulation with Integrated Circuit Emphasis), který byl vyvinut na universitě v Berkley v Kalifornii. PSpice je komerční verze registrovaná ochrannou známkou OrCAD Corporation. Orcad Capture je ucelený balík nástrojů pro návrh elektronických schémat včetně využití možnosti přechodu do jiných systémů jako např. návrh plošných spojů, analogové a číslicové simulace a návrh programovatelných obvodů. Základním pilířem návrhu schématu jsou knihovny schematických značek, součástek a symbolů. S ohledem na to, že elektronický průmysl nabízí neustále nové typy součástek, je možné knihovny plynule doplňovat a obměňovat. Vlastní návrh elektronického schématu spočívá ve vyvolání schematických značek z knihovny, jejich umístění na pracovní ploše a propojení jejich vývodů. ORCAD Capture umožňuje i hierarchický návrh a různé techniky propojování pomocí vodičů (sběrnice, návěští, napájecí symboly). Kromě výstupů pro náročné analogové a číslicové simulace umožňuje program i účinnou kontrolu návrhových pravidel, která odhalí formální chyby obvodů (nezapojené vstupní piny, výstupní piny zapojené na napájení apod.). Výstupem z návrhu může být tisk schématu na tiskárně, seznamu použitých součástek, různé typy souborů dat v různých formátech umožňující další zpracování schématu (netlít pro generaci plošného spoje, simulaci apod.) [5].

V simulačních schématech, zobrazených na Obrázcích 15 a 19, jsou použity pulsní zdroje napětí VPULSE, jejichž parametry jsou:

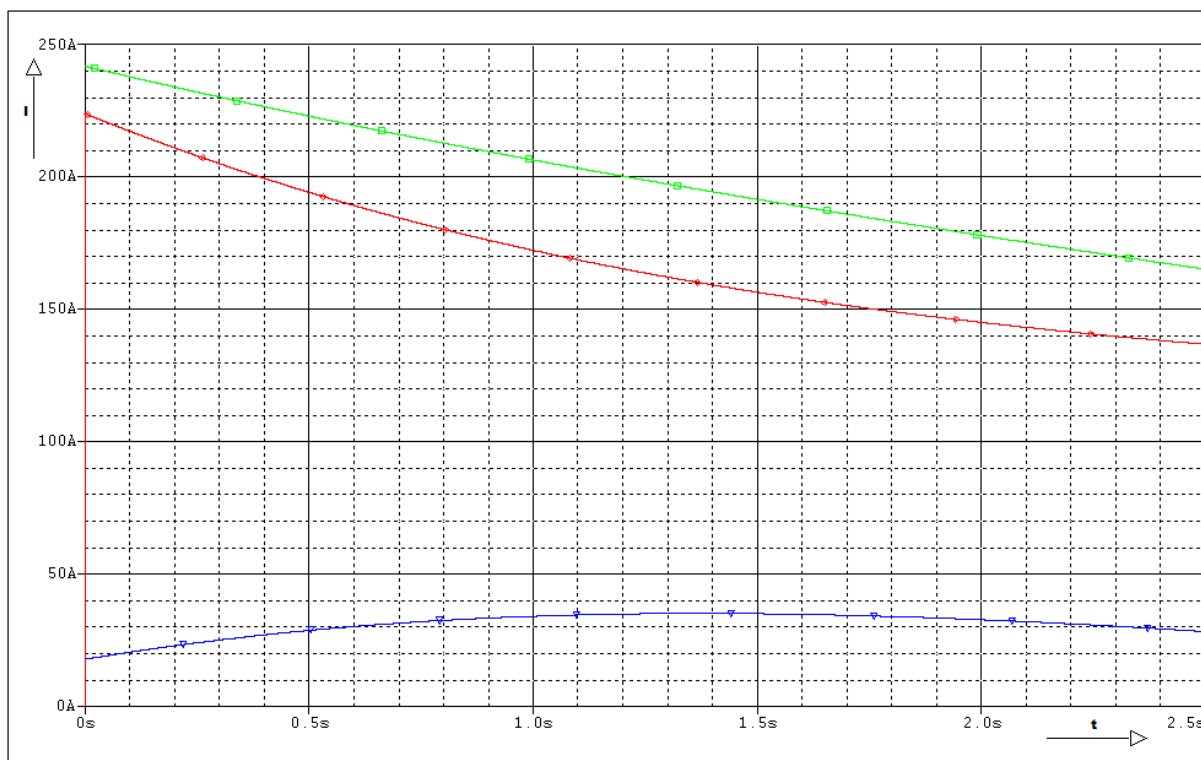
TD - doba zpoždění	[s]
TR - doba nárůstu napětí	[s]
TF - doba poklesu napětí	[s]
PW - šířka pulsu	[s]
PER - délka periody	[s]
V1 - úroveň napětí 1	[V]
V2 - úroveň napětí 2	[V]

4.1 Simulace HB při startovacím režimu

Simulační model HB zobrazený na obrázku 15, vychází z funkčního schématu měniče ve startovacím režimu znázorněného na obrázku 13. Místo klasického stejnosměrného zdroje, který by měl simulovat baterii, byl použit proměnný stejnosměrný napěťový zdroj, na kterém se nastavuje úroveň velikosti napětí v čase. Díky toho bylo možno nastavit pokles napětí během startu na úroveň 10V. U spínačů S_1 a S_2 byla snížena hodnota vnitřního odporu při spínání na úroveň 0.0001Ω . Spínání je realizováno pulsními napěťovými zdroji. Na UCAP je nastavena počáteční podmínka 13,8V, která simuluje plné nabití ultrakapacitoru před startem. V tomto režimu představuje odpor s hodnotou $0,0552\Omega$ startér. Je zapotřebí aby byl spínač S_2 rozepnutý a spínač S_1 sepnutý, aby se mohl elektrický obvod uzavírat přes startér.

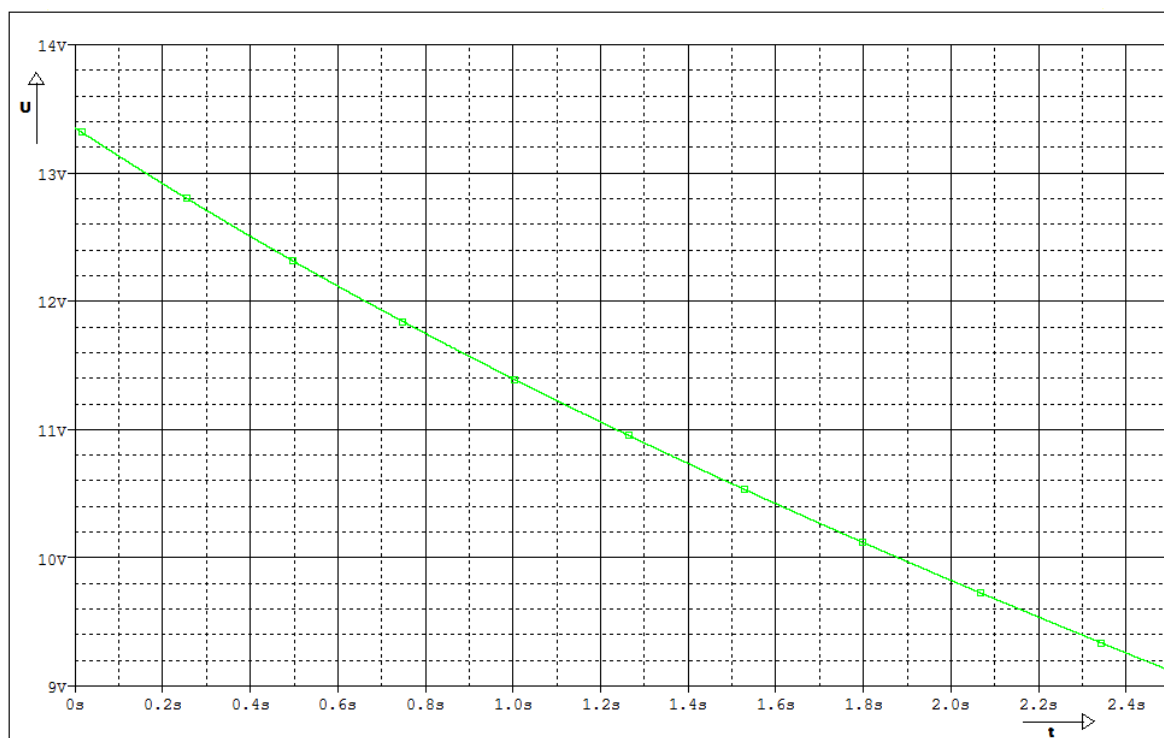


Obrázek 15 Simulační schéma HB ve startovacím režimu



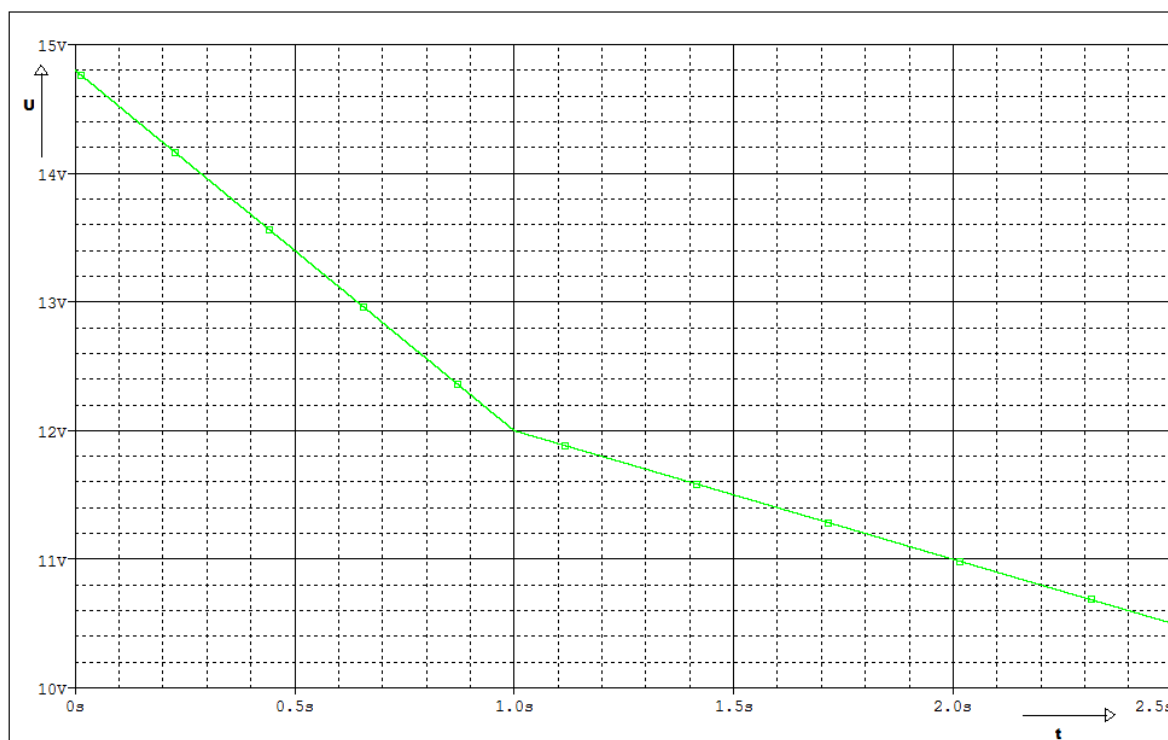
Obrázek 16 Průběhy proudů ve startovacím režimu

Obrázek 16 zobrazuje průběhy proudů ve startovacím režimu. Zelená křivka znázorňuje odběr proudu startéru. Červená křivka znázorňuje proud, který dodává startéru ultrakapacitor. Modrá křivka znázorňuje velikost proudu, kterou odebírá startér z akumulátoru. Baterie je dimenzována na maximální výstupní proud 50A, což odpovídá.



Obrázek 17 Průběh poklesu napětí na UCAP při startu

Obrázek 17 znázorňuje pokles napětí na ultrakapacitoru po dobu 2,5s, což odpovídá době startu. Vidíme zde, že napětí klesne téměř na úroveň 9V, což je minimální přípustná hodnota napětí, kterou UCAP snese.

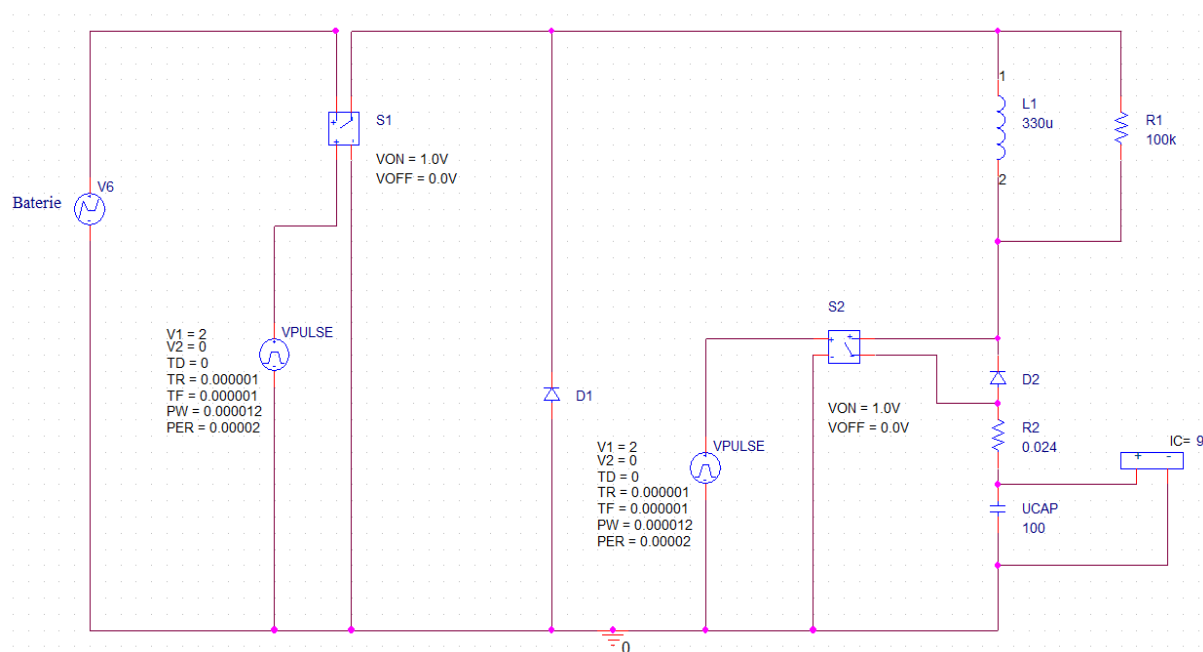


Obrázek 18 Průběh poklesu napětí na baterii při startu

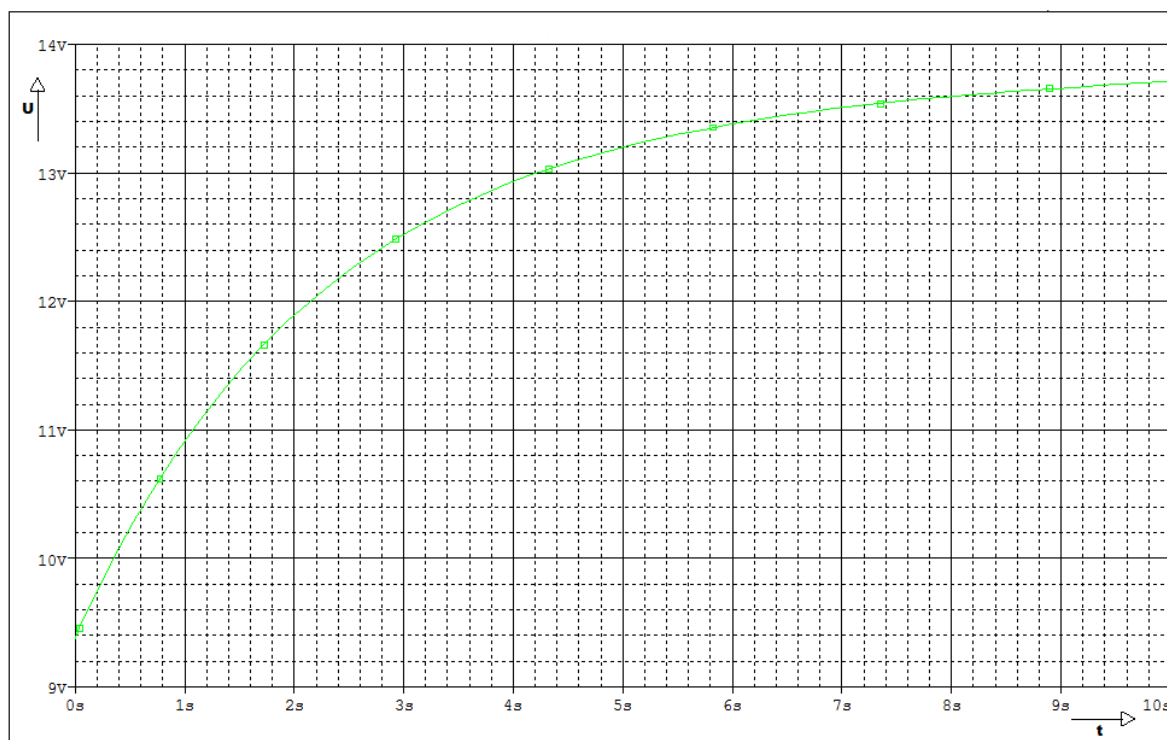
Na obrázku 18 je vidět pokles napětí na akumulátoru v době startování. Minimální přípustná hodnota napětí na akumulátoru nesmí klesnout pod 10V, jinak by došlo k poškození baterie.

4.2 Simulace HB v režimu dobíjení ultrakapacitoru

Simulační model HB zobrazený na obrázku 19, vychází z funkčního schématu měniče v režimu dobíjení UCAP znázorněného na obrázku 14. U spínačů S_1 a S_2 byla snížena hodnota vnitřního odporu při spínání na úroveň 0.0001Ω . Spínání je realizováno pulsními napětovými zdroji. Je zde uvedena počáteční podmínka, kdy na UCAP je ve vybitém stavu 9V. Místo klasického stejnosměrného zdroje, který by měl simulovat baterii, byl použit proměnný stejnosměrný napětový zdroj, na kterém je v režimu dobíjení UCAP nastavena po celou dobu simulace hodnota 14,8V, což simuluje plné nabití baterie. Z důvodu zjednodušení zde není uveden alternátor, který by simuloval dobíjení baterie a proto je na baterii nastavena pevná hodnota 14,8V. Není zde naznačen ani startér, který je v tomto režimu rozeplý.

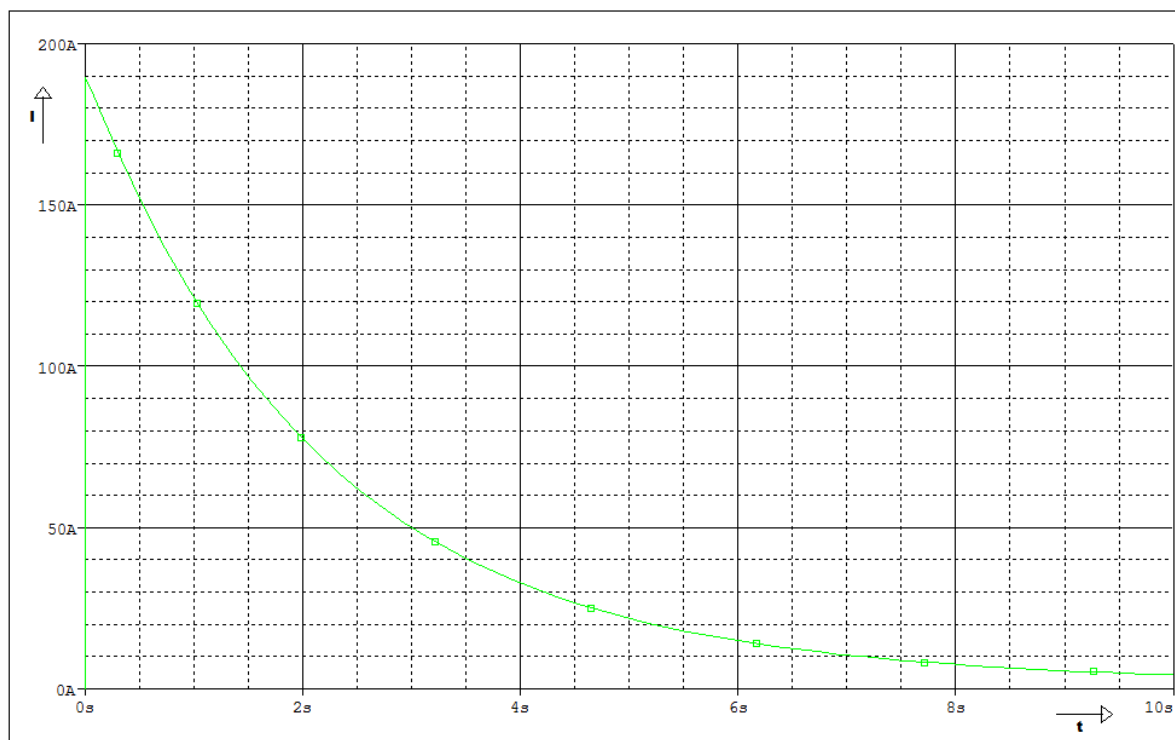


Obrázek 19 Simulační schéma HB v režimu dobíjení UCAP



Obrázek 20 Průběh napětí na UCAP v režimu dobíjení

Obrázek 20 zobrazuje průběh dobíjení napětí vybitého UCAP. Je zde změřena doba, kdy se ultrakapacitor z vybitého stavu 9V nabije zpět na svou maximální hodnotu 13,8V. O dobíjení UCAP se stará nabitý akumulátor.



Obrázek 21 Průběh proudu tekoucího ultrakapacitorem v režimu dobíjení

Obrázek 21 zobrazuje průběh proudu, kterým je dobíjen ultrakapacitor po dobu 10s.

Závěr:

V první kapitole bakalářské práce je proveden rozbor dostupných akumulčních prvků. Jsou zde popsány výhody, nevýhody a možnosti využití používaných zdrojů elektrické energie.

Cílem druhé kapitoly bylo sestavit koncepční řešení hybridní za předem definovaných podmínek. V principu jde o sloučení současně nejlepšího akumulátoru s UCAP, čímž pokryjeme nedostatky jednotlivých zdrojů elektrické energie a vytvoříme tak téměř ideální zdroj elektrické energie. Statické parametry HB budou dány typem použitého akumulátoru a dynamické kapacitou UCAP.

Třetí kapitola se zabývá návrhem vhodného funkčního schématu měniče hybridní baterie. Vychází se z předchozích předpokladů, které jsou pro návrh HB směrodatné. Jsou zde podrobně popsány režimy, ve kterých může měnič pracovat.

Ve čtvrté kapitole jsem na základě předchozího rozboru sestavil simulační model hybridní baterie. Zobrazené průběhy vypovídají o vlastnostech HB. K řízení spínání jednotlivých spínačů jsem použil pulsní napěťové zdroje VPULSE, čímž došlo k velkému zjednodušení samotného řízení HB. V reálném provozu by muselo být řízení řešeno jiným, podstatně komplikovanějším způsobem a byla by potřeba napěťová i proudová regulace na akumulátoru i UCAP. U použitého typu akumulátoru by nesmělo jeho napětí klesnout pod úroveň 10V, jinak by došlo k jeho zničení. To samé platí o UCAP, kde je hodnota minimálního napětí v našem případě stanovena na 9V.

Všechny body zadání byly splněny. Základní myšlenkou této práce je náhrada doposud používaného zastaralého olověného akumulátoru, který je stále nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie v automobilovém průmyslu za podstatně dynamičtější zdroj elektrické energie zvaný hybridní baterie.

Seznam použité literatury

- [1] ŠTĚRBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů. Computer press, Praha, 2004. 182 s. ISBN 80-251-0211-4
- [2] KREJČÍŘÍK, A.: DC/DC měniče. BEN-technická literatura, Praha, 2001. 111 s. ISBN 80-7300-045-8
- [3] KAMEŠ, J.: Alternativní pohon automobilů. BEN-technická literatura, Praha, 2004. ISBN 80-7300-127-6
- [4] ČERBOHORSKÝ, T.: Hybridní posunovací lokomotiva, Diplomová práce, Pardubice, DFJP 2009.
- [5] PAVELEK, T.: Modelování a simulace elektronických systémů, část 1. Skriptum VŠB Ostrava 2006.
- [6] KALINA, E.: Aplikace ultrakapacitorů v dopravních systémech, Disertační práce, Brno 2008.
- [7] OLEJÁR, M.: Hybridná batéria jako sekundárny napájací zdroj s vylepšenou dynamikou výstupného výkonu, Disertační práce, Technická universita v Košicích, Košice 2010.
- [8] GÁLUS, M.: Preregulátory pro spínané zdroje, Bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2009.
- [9] CHLEBIŠ, P.: Výkonová elektronika I pro kombinované a distanční studium. Skriptum VŠB Ostrava 2003.